

電気アナログ法について (第4報)

齋藤 二郎
西林 清茂

Electrical Analogue Method (Part 4)

Jiro Saito
Kiyoshige Nishibayashi

Abstract

The fundamental method of analysis and some examples of analysis by the Electrical Analogue Method have been introduced up to the last report. This report also shows a new example of analysis and illustrates the arrangements of relief-wells and sheet piles for cutting off ground water and curtain grouting in construction of a new dock analyzed by a three-dimensional Electrical Analogue Method using gelatin. In the three-dimensional Electrical Analogue Method, it is necessary to accurately catch the formation and permeability of each layer beforehand. In these experiments, not only normal soil tests, but also detailed investigations of the ground base by Sonoprobe were carried out.

概 要

電気アナログ法については前報までに基本的解析法といくつかの解析例を紹介してきた。今回の報文も、新たな解析例を示すもので、減圧揚水型新設ドックのリリーフウェルおよび透水層の止水を目的とした止水天板、薬液注入によるカーテングラウトの配置計画を寒天を使用した電気アナログ法で三次元的に解析したものである。三次元的電気アナログ法では現地盤の地層構成と各地層の透水性をまえもって確に把握しておくことが必要であるが、今回の実験では通常の土質調査だけでなく、音波探査の一種であるソノプローブ法も駆使して詳細な地盤調査を実施している。

1. まえがき

当ドックは渠底減圧タイプであり、地下水揚圧力対策のために、渠底下に減圧排水パイプとリリーフウェルを設置し、ドックの渠底に作用する揚圧力を減少させる方式である。一般の渠底減圧タイプでは渠底下に集水パイプを設置するだけであるが、当ドックの位置する海底地盤は砂、砂レキから成る透水層と、粘土、シルトから成る不透水層が複雑に互層をなしている上、渠底下の土層は不透水層が大部分であるために、渠底下の減圧排水設備だけでは不透水層下に分布する砂レキ透水層の地下水圧減少が不可能であった。しかも、この砂レキ透水層の地下水圧は渠底下の不透水層と一緒にドックを持上げるだけの揚圧力を有しており、砂レキ透水層の地下水圧を低下させることが絶対必要条件であった。そこで、砂レキ層の地下水を揚水し、揚圧力を減少させるためにリリーフウェルの設置を計画したわけである。

概略地盤調査にもとづいて実施した電気アナログ実験の結果によれば、砂レキ層の透水係数が大なために、揚水量が非常に多量となると判断された。そこで、全

体の湧水量減少のために、透水層を遮断する深さまで鋼矢板を打込み、鋼矢板長の不足する部分はグラウト止水壁を施工することとした。

この報文は上記の止水対策を確実にしかも経済的にするために実施した電気アナログ本実験についてのものであり、第一回電気アナログ実験のあとに実施した詳細な現地盤調査結果にもとづいている。

当ドックは図-1に示すように、長さ350m×巾85mのNo. 1 DOCK と長さ570m×巾85mのNo. 2 DOCK の2基から成り、両 DOCKは60mの間隔を置いている。

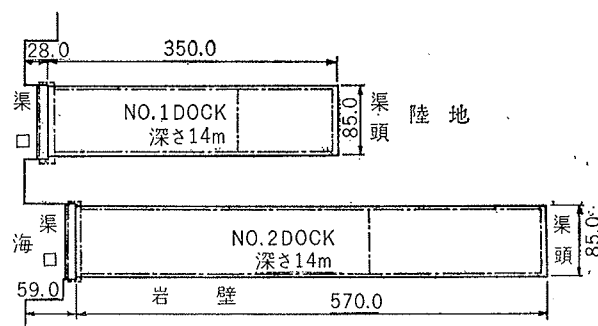


図-1 ドック平面図

2. 地盤状態

当ドックは旧海域を一旦、浚渫によって埋立て陸地化してから、建設を開始したもので、地盤の状態は、浚渫埋立土であるシルト混り砂層が15m程度分布し、その下に、粘土・シルトから成る不透水層および部分的に砂層、ついで、大略、砂層、粘土層、第1砂レキ層、粘土層、第2砂レキ層、粘土層の順に互層をなして分布する。図-2に No. 2DOCK の3縦断面を示すが、わずか40m程度離れた位置で地層の構成、層厚が著しく変化している状態が明らかである。

揚圧力の関係から問題となる層は第一砂レキ層である。この層と粘土層を介在して分布する上の砂層とはほとんど連続していないので、たとえ、砂層の水圧を低下させても、第1砂レキ層の水圧は減少しない。又、第1砂レキ層と第2砂レキ層は多くの箇所連続しており、ドック周囲の第1砂レキ層のみ止水したとしても第2砂レキ層からの補給があるので止水効果は小さいことが推測される。

透水層については主として第1砂レキ層を対象に現場揚水試験を実施した結果、表-1の透水係数を得た。第2砂レキ層と砂層の値は揚水試験と推定による。

地 層 区 分	透水係数 (cm/sec)
第 1 砂 レ キ 層	6×10^{-2}
第 2 砂 レ キ 層	3×10^{-2}
砂 層	6×10^{-3}

表-1 各透水層の透水係数

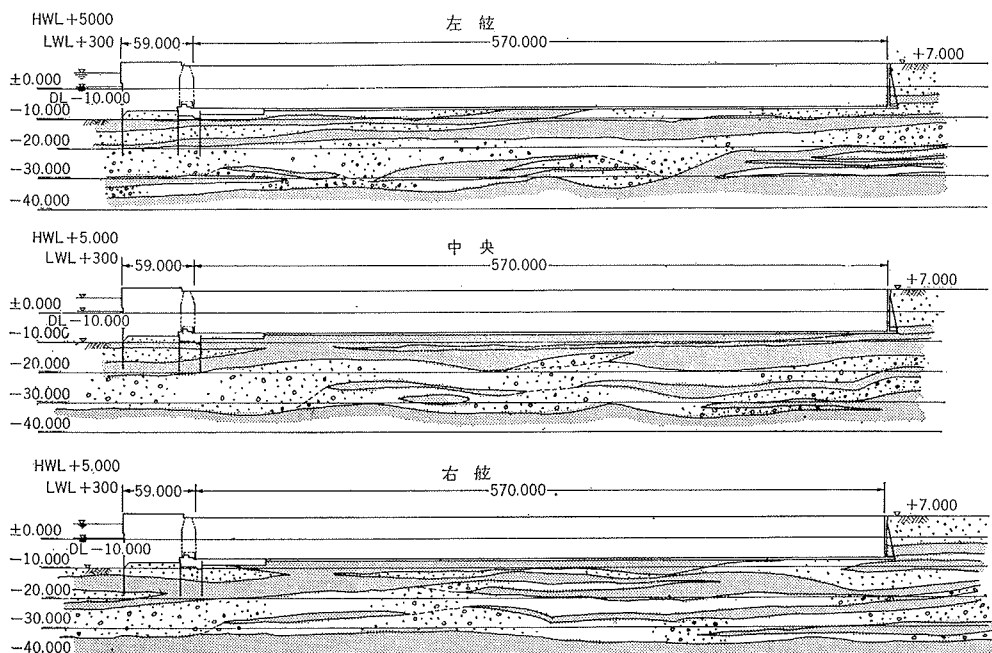


図-2 ドック渠底下の地盤各地層の分布状態

3. 止水対策とリリーフウェル設置計画

設計、第1回概略電気アナログ模型実験結果から判断して第1、第2砂レキ層に対する何らかの止水対策がなければ、リリーフウェルからの湧水量は非常に大となることが予想された。

そこで、ドック下の砂レキ層に流入する地下水を減少させるために、止水矢板、グラウト止水壁を計画した。グラウト止水壁は止水矢板打設困難な深い砂レキ層の止水を目的としている。

3.1. 止水矢板設置計画

止水矢板の配置は No. 1, No. 2ドックを各々囲む方式とし、根入れ長は地盤の強度との関連からDL-33mを最大とした。この深さであると、第1砂レキ層下に分布する粘土層まで大部分到達するが、完全に止水することはできない。その原因には、(イ)止水矢板長が不足して第1砂レキ層を完全に遮断できないこと、(ロ)第1砂レキ層下の粘土層がドック範囲内で一部分布しておらず、第2砂レキ層から第1砂レキ層に流入することである。図-3に止水矢板設置位置および止水矢板長を示す。

3.2. グラウト止水壁設置計画

止水矢板で止水不可能な砂レキ層はグラウトで止水する。グラウト止水壁の設置位置を図-3中に併示する。これらの止水様式は図-4の case 1, 2 に分類される。

3.3. リリーフ・ウェル設置計画

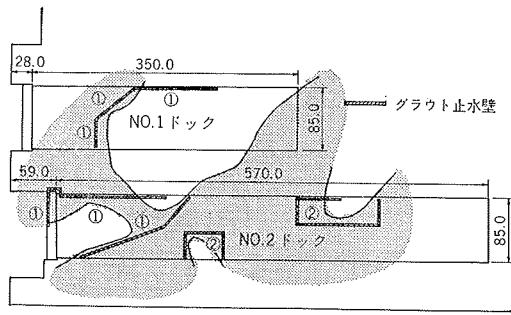


図-3 グラウト止水壁設置計画

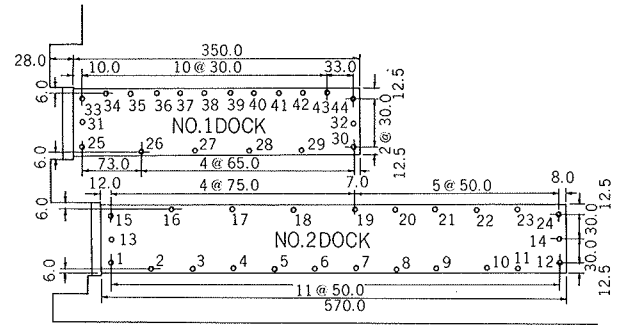


図-5 リリーフウェル設置計画 (A案 44本)

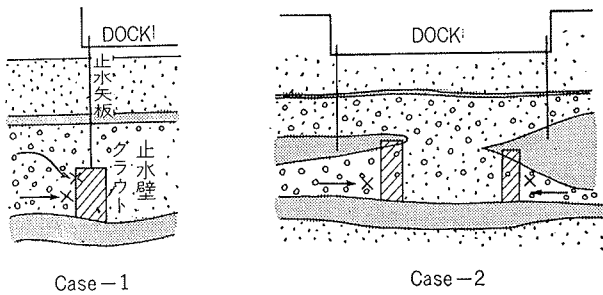


図-4 グラウト止水壁設置様式

リリーフウェルは No. 1, 2 DOCK 合計して 44 本 (A案) と 77 本 (B案) の 2 種類とする。リリーフウェルは原則として第 1 砂レキ層に設置し、管径 ϕ 600mm の鋼管を加工したものである。

4. 電気アナログ模型実験

電気アナログ模型実験の模型縮尺は 300 分の 1 とし、実験槽の大きさは 3.00m \times 2.00m であるので、ドックを中心とした 900m \times 600m の範囲の模型地盤を作成できる。

4.1. 模型地盤

模型地盤で表わす深さは不透水層であるシルト粘土層が一面に分布している DL-35m とした。極めて複雑な分布状態を示す各地層の模型は土の透水層で区分し、それぞれの透水性に対応した比伝導度の導電物質で模型地盤を表わす。実際には表-2 に示す 4 層に区分し、寒天の比伝導度、導電物質を定めた。不透水であるシルト、粘土層は非導電物質のパテを使用した。

模型地盤の作成にあたっては、打設時の寒天の流動性、分布状態を考慮して約 20 段階に分けて作成した。

地層区分	透水係数 cm/sec	比伝導度 $1/\Omega \cdot \text{cm}$	導電材料
粘土・シルト層	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	Near 0	パテ
砂層	6×10^{-3}	4.6×10^{-3}	寒天(食塩 0.3%)
第 1 砂レキ層	6×10^{-2}	4.6×10^{-2}	" (" 4.7%)
第 2 砂レキ層	3×10^{-2}	2.3×10^{-2}	" (" 2.1%)

表-2 模型地盤各層の導電材料

4.2. 各構造物の模型

止水矢板は実際にはジョイント部からの漏水があるが、その程度は不明確であるので、完全止水と仮定し、3m/m 厚さのプラスチック板とした。

グラウト止水壁についても、現在のグラウト技術では完全止水を期待することはできないが、一般にいられている 70~90% の止水効果を目安として、予備実験を行なって、開口率 0.25% のプラスチック板を使用した。この開口率は一次元的な実験で定めたため、実際には誤差を含んでいる。

又、リリーフウェルの模型は材料として鋼線を使用したもので、リリーフウェルのスリットフィルター部分のみ裸鋼線とし、他はエナメルペイントを塗布して非電導性とした。

この他、ドックの模型はプラスチック板を加工したものである。

4.3. 地下水の流入流出境界条件の設定

流入境界条件はドック範囲の透水層に地下水を定常的に供給し得る水源であり、電気アナログ実験では実験槽の大きさの関係から、実験槽の側壁における透水性地盤も流入源となる。実際にはポテンシャル低下が 0 となる影響圏が実験槽側壁となれば理想的である。今回の流入源の種類は陸側からの被圧伏流水と海域である。

流出境界条件は第 1 砂レキ層のリリーフウェルと渠底下に設置された減圧排水パイプの 2 種類である。

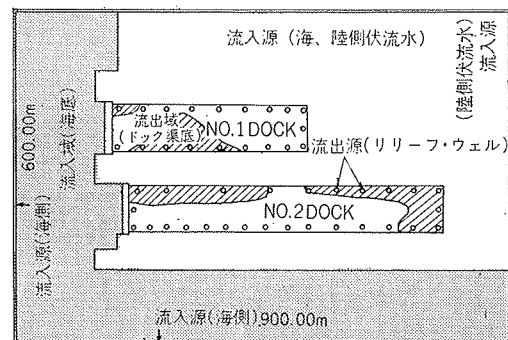


図-6 地下水流入・流出境界条件

4.4. 実験の種類

電気アナログ模型実験の目的は上記の止水対策に対する渠底下減圧排水パイプとリリーフウェルからの湧水量を解析することであり、又、揚圧力対策としてのポテンシャル解析を行なうことである。そこで、実験の種類としては止水矢板設置条件、グラウト止水壁設置条件を変化させて、表-3に示す5種類とした。

ただし、実験-4, 5はグラウトの止水効果が不明確であるので、参考までの取扱いとした。

種類	目的	止水矢板条件	グラウト止水壁条件
1	止水対策なしのときの全湧水量ポテンシャル分布	無し	無し
2	上部砂層のみ止水したときの全湧水量	上部砂層まで打設	無し
3	第1砂レキ層までの止水矢板打設で、グラウト止水壁なしの全湧水量、ポテンシャル分布。	第1砂レキ層まで打設	無し
4	グラウト止水壁の一部実施による湧水量低減	"	グラウト止水壁一部 ①
5	全止水対策時の湧水量とポテンシャル分布	"	グラウト止水壁全域 ① ②

表-3 電気アナログ実験の種類

4.5. 実験設備および配線

配線図を図-7に示す。測定設備は電流計、電圧計および変圧器が主である。

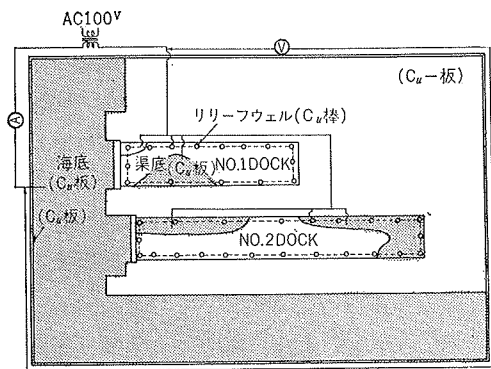


図-7 電気アナログ実験の配線図

5. 実験結果

5.1. 湧水量解析について

湧水量の算定は各実験とも No. 1, 2 DOCK のリリーフウェル、渠底減圧排水パイプ各々と両者同時、DOCK 別、両者 DOCK 同時と湧水量全量から排水設備各々の分担量まで行なった。

止水条件と湧水量の変化を次に箇条書きにして述べる。

(i) 止水対策が全く無い場合には No. 1, 2 DOCK 合

項目	No.1 DOCK				No.2 DOCK			
	リリーフウェル	リリーフウェル渠底減圧	渠底減圧	全湧水量	リリーフウェル	リリーフウェル渠底減圧	渠底減圧	
止水条件				2,070				
無し	1,050	1,070	20		600	1,000	400	
上部砂層のみ止水矢板打設	900	920	20	1,510	870	880	20	
第1砂レキ層まで止水矢板打設	430	450	20	810	360	360	0	
第1砂レキ層止水矢板打設 + グラウト止水壁一部分	90	100	10	370	270	270	0	
第1砂レキ層止水矢板打設 + グラウト止水壁全域	90	95	5	270	175	175	0	

表-4 各止水条件下の湧水量

わせた湧水量は 2,070t/h となり、No. 1, 2 DOCK 各々 1,000t/h である。DOCK の大きさに比較して No. 1 DOCK の湧水量が大であるのは、第1砂レキ層の層厚が大のためである。No. 2 DOCK では渠底減圧排水パイプからの湧水量も大きい。

(ii) 渠底下に分布する砂層に上水矢板を打設した場合には No. 2 DOCK の渠底減圧排水パイプからの湧水量は大巾に減少するが、いままでも砂層に流入していた地下水が流路変更して第1砂レキ層に流入するので、リリーフウェルの湧水量は逆に増大する。

(iii) 第1砂レキ層の大部分を鋼矢板で止水した場合、No. 1, 2 DOCKとも湧水量は急激に減少し、両DOCKとも渠底減圧排水パイプからの湧水はほとんど0となり、リリーフウェルからの湧水量のみとなる。リリーフウェルの湧水量は止水矢板長不足のため、(ii)の湧水量に比較して1/2程度のみ減少にとどまった。

(iv) 止水矢板長不足、ドック範囲内の地下水流入箇所にてカーテングラウト止水壁を造成した場合、カーテングラウトの止水効果は施工条件によって大巾に異なるが、今回、グラウトの止水効果が一次元流で約80%になる模型を使用して参考までに算出した結果、(i)No.1 DOCK の対象全域と No. 2 DOCK の渠口部のみのグラウト止水壁造成 (図-3の①のライン) では、全湧水量 370t/h であった。(ii) No. 2 DOCK も対象全域をグラウト止水壁造成した場合には、湧水量が 270 t/h に減少し、止水対策なしの場合の33%となる。ただし、この値はあくまでグラウト止水壁の止水効果に左右されることを念頭におく必要がある。

5.2. ポテンシャル分布 (揚圧力) について

リリーフウェルと減圧排水パイプから地下水を湧水させれば、ドック範囲下にある地下水の水圧は減少する。実験では、地盤内各位置にポテンシャル測定点を

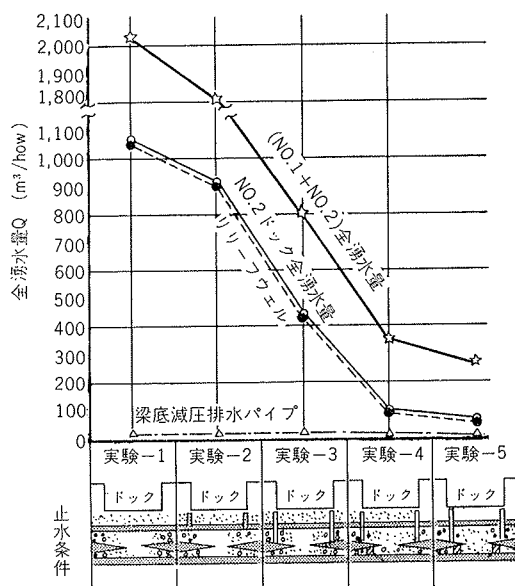


図-8 No. 1 DOCK の湧水量変化

設けて、各止水条件下の水圧ポテンシャルを測定した。測定結果の1例を図-9に示す。

ドック渠底の深さと地下水位の位置から判断して、揚圧力は最大 12t/m^2 である。一方、揚圧力に対抗する抵抗重量は、たとえば、最も土被り圧の少ない X-3 地点（図-9）において 5.8t/m^2 であるため、揚圧力減少の対策を設ける必要があるわけである。減圧対策として、渠底減圧パイプとリリーフウェルを設置し、止水対策無しの実験-1の場合、ドック範囲内での残留ポテンシャルは約30%である。したがって、揚圧力は $12 \times 0.30 = 3.6\text{t/m}^2$ となって、安全である。しかし、湧水量が $2,070\text{t/h}$ と膨大であるため、上述したような止水対策が必要となる。

以下、各止水条件下における水圧ポテンシャル変化を簡所書きにして示す。

- (i) 上部砂層を止水した場合、砂層部分の水圧ポテンシャルが若干低減し、ドック内外でのポテンシャル差が見られる。第1砂レキ層のポテンシャル変化はほとんどない。
- (ii) 第1砂レキ層まで止水矢板を打設した実験-3の場合には、第1砂レキ層内でもドック内外のポテンシャル差が見られ、ドック内の残留水圧ポテンシャルは約20%である。上部砂層の残留水圧ポテンシャルはNo. 1 DOCK で約20%、No. 2 DOCK では、砂層と砂レキ層間の粘土層分布の影響によって約13%と大きく低下している。

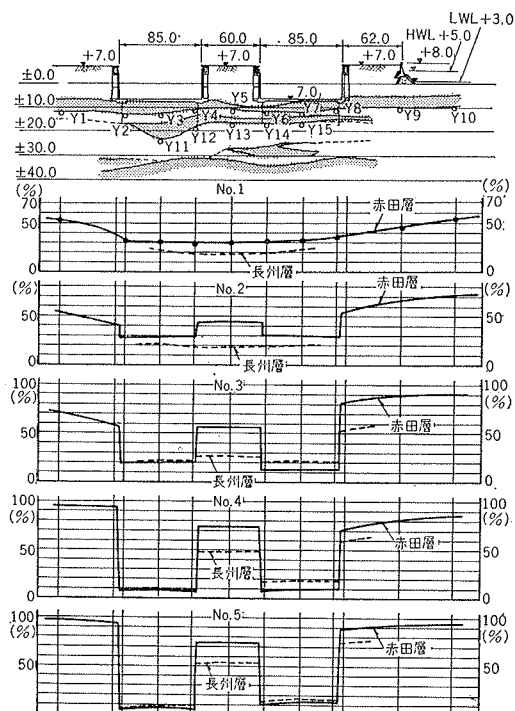


図-9 各止水条件下における水圧ポテンシャル分布

- (iii) グラウト止水壁も加えた実験-4、5では、残留水圧ポテンシャルがさらに小さくなり、全域グラウト止水壁を造成した場合には 上部砂層、第1砂レキ層とも、残留水圧ポテンシャルは20%以下となって、揚圧力に対しては十分の安全率となる。

6. あとがき

非常に複雑な地層分布を示す地盤内の水理解析は既成の方法では困難であるが、三次元的電気アナログ法によれば極めて容易に解析できる。ただし、地盤の構成、地層分布、各地層の透水係数などの事前調査を十分に確実に実施する必要があることは言うまでもない。当工事は現在施工中であるが、ディーブウェル全揚水量が $1,000\text{t/h}$ と今回の実験値の1/2となっている。今後の工事進行と合わせて解析してゆきたい。電気アナログ実験にあたっては技術部設計課小笹課長、菊池、下山職員および現場田中職員のご協力を得たことを附記し、感謝の意を表します。

(注①) リリーフウェル……集水部分にスリットを設け、目詰まりを防止するために金鋼を被覆した長尺の鋼管を不透水層を貫通して透水層に設置したもので、頭部がドック渠底に位置しているので、地下水圧によって自然湧水する。